

左手微带传输线在毫米波天线阵中的应用

张忠祥, 朱旗, 徐善驾

(中国科学技术大学 电子工程与信息科学系, 安徽 合肥 230027)

摘要:提出了一种新的左手微带传输线结构. 基于这种结构, 构建了左-右手混合式天线阵微带馈线, 通过控制该馈线中左、右手传输线的长度, 可以在特定长度传输线上获得零相位延迟. 将此种传输线作为馈线应用到串联馈电的毫米波微带天线阵中. 结果表明, 利用此种传输线馈电和传统右手传输线馈电相比, 可以避免由传统右手馈线在天线激励点之间引入的相位差, 从而克服了固有的天线波束偏移.

关键词:左手传输线; 左-右手混合传输线; 毫米波天线; 微带阵列

中图分类号: TN811+.7, TN822+.3 **文献标识码:** A

APPLICATION OF LEFT-HANDED MICROSTRIP TRANSMISSION LINE IN THE DESIGN FOR MILLIMETER WAVE MICROSTRIP ARRAY

ZHANG Zhong-Xiang, ZHU Qi, XU Shan-Jia

(Dept. of EEIS, University of Science & Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A novel left-handed microstrip transmission line (LH-TL) structure was presented. Based on this structure, feed lines with composite right/left-handed transmission line (CRLH-TL) structure for microstrip arrays were also presented. By controlling the lengths of LH-TL and RH-TL parts in CRLH-TL, naught phase shifts of the transmission line can be obtained. As an application, the CRLH-TL has been used as feed line in series fed millimeter wave microstrip arrays. Numerical results show that, by means of the CRLH-TL, the insertion phase shifts at excited ports of microstrip elements can be eliminated. As a result, the inherent beam shifts disappear.

Key words: left-handed transmission line (LH-TL); composite right/left-handed transmission line (CRLH-TL); millimeter-wave antenna; microstrip array

引言

和传统右手材料不同, 左手材料同时具有负的介电常数和负的磁导率. 早在1968年, Veselago就在理论上预示了左手材料在传输电磁能量时体现出一些奇异的现象, 如反向多普勒频移和反向切伦科夫辐射等^[1]. 由于自然界中至今没有发现天然的左手材料, 所以目前还未能将左手材料运用到实际应用中. 最近研究^[2]表明, 可以利用对偶原理来等效地实现左手材料, 其中最具有吸引力的是 Itoh 用微带线实现的左手材料特性^[2]. 然而该文中为了得到够大的并联电感, 其等效的左手传输线单元结构如图2(c)所示, 具有很大的尺寸, 从而在一定程度上

限制了它在微波和毫米波集成电路中的应用.

本文首先提出了一种新的微带传输线结构, 它具有结构简单和紧凑的特性; 其左手特性由它表现出的后向辐射和相位超前特征所证实. 文中还进一步构建了左-右手混合传输线结构, 并将其应用到串联馈电的毫米波微带天线阵列中. 由于右手传输线和左手传输线分别具有相位延迟和超前特性, 通过控制左-右手混合馈线中右手传输线和左手传输线的长度, 可以获得零相位延迟, 从而避免由天线单元馈电处非零相位延迟所导致的波束偏移.

1 左手微带传输线的实现

1.1 左手传输线

由图 1 所示的无耗左手传输线对偶等效电路²,可以得到传输线的 ω - β 的关系式:

$$\beta(\omega) = -1/\omega\sqrt{L'C'} \quad (1)$$

根据定义,如图 1 所示等效电路的左手传输线的相速度和群速度分别为:

$$\begin{aligned} v_p &= -\omega^2\sqrt{L'C'} \\ v_g &= +\omega^2\sqrt{L'C'} \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可以看出由此单元构成的均匀传输线上传输的电磁波的群速度和相速度方向相反,说明该传输线具有左手材料特性.

1.2 左手微带传输线的实现

为了克服²中给出的左手单元结构面积过大的缺点,本文提出如图 2(a)所示左手微带传输线的单元结构,它利用交趾电容两个最外侧分支接地来作为两个并联电感,使该结构具有结构简单和紧凑的特性,从而单元尺寸和面积大大减小.

图 2(b)给出了由 9 个图 2(a)所示左手单元构成的微带传输线的 E 面模拟辐射方向图,可以看出明显的左手材料所特有的后向辐射特征³.同时由于相速度和群速度反向的特性,电磁波在左手材料中传播的时候,沿着传播方向的电磁波的相位将超前.表 1 给出了本文提出的左手微带结构的相位和单元数的关系,通过表 1 可以看出随着左手微带传输线长度的增加即单元数的增加,电磁波的相位不断的超前,与传统的右手传输线的相位滞后相反.

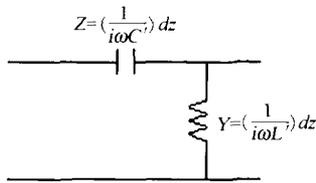


图 1 无耗左手传输线对偶等效电路的无限小单元模型
Fig. 1 Infinitesimal circuit model of the LH-TL as the dual of the conventional TL

表 1 左手微带单元数与对应的电磁波相位
Table 1 Numbers of the units of LH-TL and the phase of EM wave

| 微带单元数 | 电磁波相位 |
|-------|--------|
| 1 | 30.07° |
| 2 | 64.49° |
| 3 | 105.1° |
| 4 | 145.5° |
| 5 | 177.3° |

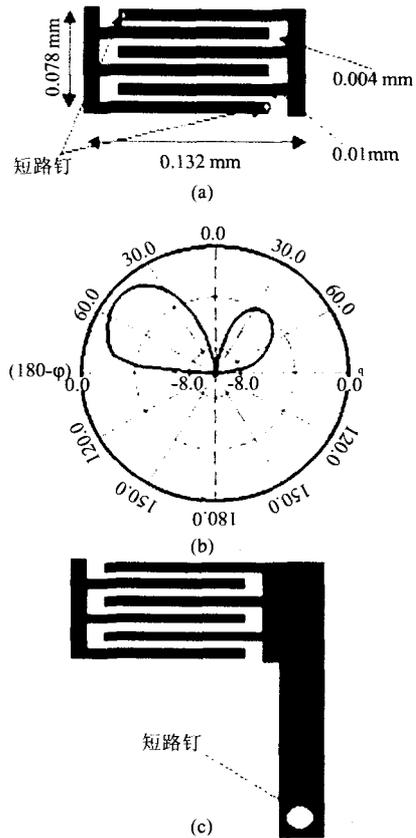


图 2 (a) 94GHz 左手微带传输线单元结构尺寸 (b) 模拟辐射方向图 (c) [2] 中提出结构示意图
Fig. 2 (a) The structure and dimension of unit circuit cell of LH-TL at 94GHz; (b) simulated radiation pattern (c) the unit structure presented in [2]

2 左-右手混合传输线在毫米波微带阵列的应用

在毫米波微带天线阵列中,为了减少插入损耗和获得更高的辐射效率,常常采用串联馈电替代并联馈电形式^[4-6].由于串联馈电结构存在着馈电点间的相位差,使得辐射方向发生偏移.为了克服这种偏移,本文应用左-右手混合微带线替代传统的右手微带线,来避免馈电点间的相位差和相应的辐射方向图的偏移.

文中以两个微带单元为例,给出右手微带线馈电和左-右手混合微带线馈电微带阵列的比较.图 3 给出了 94GHz 两个 H 型缝隙耦合毫米波微带天线单元阵列的结构,馈电点间距 $d = 1\text{mm}$.表 2 给出了图 3 结构中的参数值.

左-右手混合传输线是由左手传输线和右手传输线串接而成,可以通过控制混合传输线中左手和右手传输线的长度比例,以满足应用中对不同相位

差的需要. 图 4 给出了图 3 中左-右手混合微带馈线的结构, 长度为 1mm. 其中左手微带线由四个如图 2 (a) 所示的左手单元组成, 长度为 0.528mm, 相位超前 145.5°; 右手微带线长度为 0.472mm, 相位滞后 145.5°, 宽度为 50 欧姆微带线宽度 0.078mm.

图 5 给出了左-右手混合线馈电天线阵的电压驻波比曲线, 可以看出该天线阵的中心工作频率为 94GHz, 在 1.5GHz 频带内驻波比小于 1.5. 图 6 给出了右手微带馈电和左-右手混合微带线馈电的两种不同馈电方式的模拟结果比较. 通过图 6 可以看出采用新的左-右手混合微带线馈电, 克服了传统右手馈电时由于馈电点的相位差而造成的天线阵列辐射方向图的偏移.

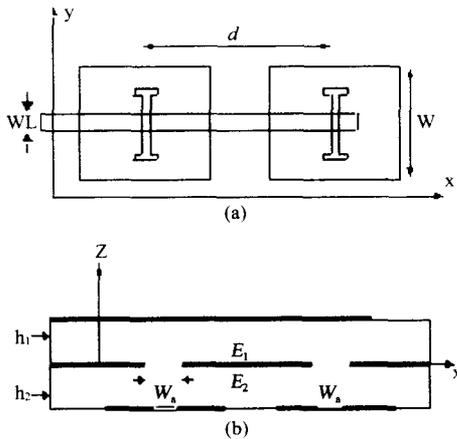


图 3 94GHz 两个 H 型缝隙耦合微带天线阵列结构图: (a) x-y 坐标面 (b) x-z 坐标面
Fig. 3 The structure of two units of aperture-coupled microstrip array antennas with H-slot at 94GHz: (a) x-y coordinate surface; (b) x-z coordinate surface

表 2 微带天线阵列结构参数

Table 2 The parameters of the microstrip array antennas

| 参数 | 数值 |
|--------------|---------|
| h1 | 0.1mm |
| h2 | 0.2mm |
| W | 0.74mm |
| Wa | 0.05mm |
| WL | 0.078mm |
| ϵ_1 | 11.7 |
| ϵ_2 | 4.2 |
| d | 1mm |

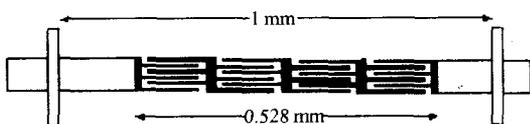


图 4 包含 4 个左手单元的左-右手混合微带线
Fig. 4 CRLH-TL feeding line consisting of 4 LH-TL units

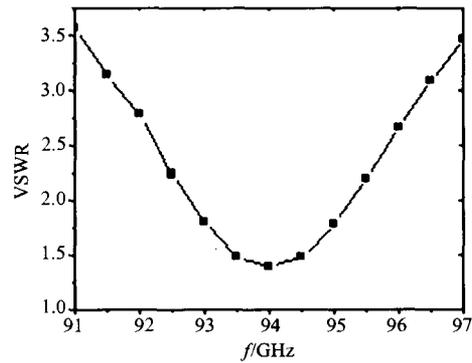


图 5 左-右手混合线馈电微带阵列天线的电压驻波比曲线
Fig. 5 The VSWR property of the antenna array fed with CRLH-TL configuration

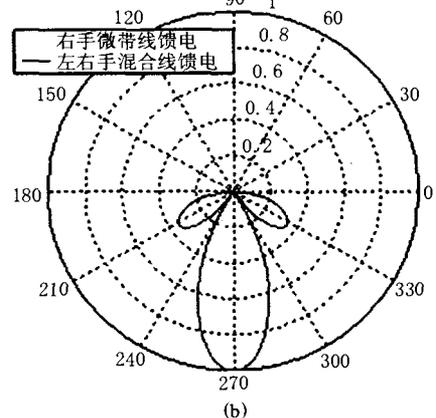
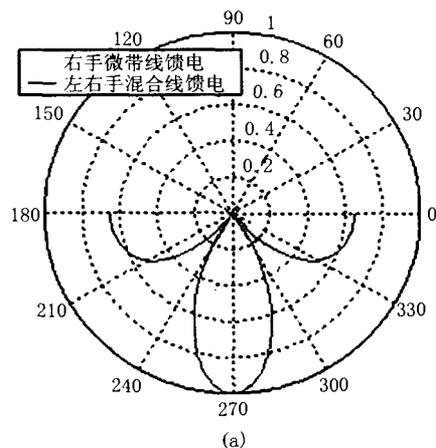


图 6 左-右手混合传输线馈电与传统右手传输线串联馈电的 94GHz 毫米波微带阵列辐射方向图 (dB) 的比较: (a) E 面方向图 (b) H 面方向图
Fig. 6 A comparison of radiation pattern (db) between millimeter-wave microstrip array with traditional series-fed and CRLH-TL-fed configuration at 94GHz; (a) E-plane (b) H-plane

(下转第 347 页)

表 1 不同 M, L 值对应的理论测速精度、最大不模糊测速范围表Table 1 Academic velocity precision and maximum discriminable velocity vs M, L

| M | 256 | 256 | 512 | 512 | 1024 | 1024 |
|--------------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| L | 23 | 35 | 12 | 18 | 6 | 10 |
| Δv_r (m/s) | 1.04 | 0.67 | 1.04 | 0.67 | 1.14 | 0.64 |
| v_{range} (m/s) | [-133.2, 133.2] | [-86.2, 86.2] | [-266.3, 266.3] | [-172.3, 172.3] | [-585.9, 585.9] | [-325.5, 325.5] |

通过仿真实验证明了这种方法的可行性、快速性. 利用本文提出的方法进行运动补偿所得的目标一维距离像可以进一步应用于毫米波 Costas 编码雷达的目标识别技术中.

REFERENCES

- [1] SUN Chang-Gui, LI Xing-Guo. Two-step stretch processing method for MMW high-resolution radar [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙长贵, 李兴国. 毫米波高分辨雷达二步伸缩处理方法. *红外与毫米波学报*), 2003, 22(6): 457—460.
- [2] ZENG Yong-Hu, WANG Xue-Song, XIAO Shun-Ping, et al. High-resolution radar target recognition based on correlation of instantaneous polarization WVD [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (曾勇虎, 王雪松, 肖顺平, 等. 基于瞬态极 WVD 相关的高分辨率雷达目标识别. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(6): 455—458.
- [3] LIU Jing, LI Xing-Guo, Wu Wen. Application of waveform entropy method for motion compensation of MMW Costas frequency hopped radar [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘静, 李兴国, 吴文. 波形熵法在毫米波 Costas 跳频雷达运动补偿中的应用. *红外与毫米波学报*), 2003, 22(4): 303—306.
- [4] LIU Zheng, ZHANG Shou-Hong. Estimation of target motion parameter in a stepped-frequency pulses radar [J]. *Acta electronica sinica* (刘铮, 张守宏. 步进频率雷达目标的运动参数估计. *电子学报*), 2003, 28(3): 43—45.
- [5] MU Shan-Xiang, LI Xing-Guo, KONG De-Chun. Doppler performance analysis of interpulse Costas FH radar signal [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (牟善祥, 李兴国, 孔德春. 脉间 Costas FH 雷达信号的多普勒性能分析. *红外与毫米波学报*), 2000, 19(4): 313—317.
- [6] Wehner D R. High resolution radar [M]. London: Artech House Inc, 1997.
- [7] Jiang Nan-Zhi, Wang Mao-Lu, Li Shao-Hong, et al. Compensation methods for stepped frequency radar HRR imaging [J]. *Journal of Electronics* (蒋楠稚, 王毛路, 李少洪等. 频率步进脉冲距离高分辨一维成像速度补偿分析. *电子科学学刊*), 1999, 21(5): 665—670.

(上接第 343 页)

3 结论

本文提出了一种新型微带左手传输线结构, 并证明了它具有左手材料的后向辐射和相位超前的特征. 由于该结构简单紧凑, 所以它特别适用于微波集成电路和毫米波集成电路. 文中给出了一个左-右手混合微带线在毫米波微带阵列中应用的例子, 利用左手传输线相位超前的特性, 控制阵列馈电点间的零相位差, 来克服辐射方向图的偏移.

REFERENCES

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of and [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 4: 509—514.
- [2] Christophe Caloz, Itoh T. Application of the transmission line theory of left-handed (LH) materials to the realization of a microstrip 'LH line' [J]. *APS. IEEE*, 2002, 2: 16—21.
- [3] Lindell I V, Tretyakov S A, Nikoskinen K I, et al. Bw media-media with negative parameters, capable of supporting backward waves [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2001, 31: 129—133.
- [4] Ramesh Garg. *Microstrip Antenna Design Handbook* [M]. Boston: Artech House, 2001.
- [5] WU Zhan-Zhan, XU Shan-Jia. Rigorous mode matching analysis of transmission characteristics for periodic dielectric structures [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (伍瞻瞻, 徐善驾. 周期介质结构传输特性的严格模匹配分析. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(1): 21—26.
- [6] JING Heng-Zhen, XU Shan-Jia. Mode matching analysis of a new omnidirectional circular rod antenna with double dielectric gratings for millimeter-wave application [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (靖恒珍, 徐善驾. 新型双介质栅毫米波棒形全向天线的模匹配分析. *红外与毫米波学报*), 2003, 22(4): 241—245.